

МИКРОБИОЛОГИЯ И ВИРУСОЛОГИЯ MICROBIOLOGY AND VIROLOGY

КОМБИНИРОВАННОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ ЭТОКСИЛИРОВАННОГО НОНИЛФЕНОЛА И НАНОЧАСТИЦ ОКСИДА МЕДИ (CuO) НА БИОПЛЕНКИ *RHODOCOCCLUS RUBER*

Баяндина Е.А.^{1,2},
Куюкина М.С.^{1,2},
Ившина И.Б.^{1,2}

¹ ФГАОУ ВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет», (614068, Пермь, Букирева, 15, Россия)

² ФГБУН «Институт экологии и генетики микроорганизмов Уральского отделения Российской академии наук» – филиал ФГБУН «Пермский федеральный исследовательский центр» УрО РАН (614081, Пермь, Голева 13, Россия)

Автор, ответственный за переписку:
Баяндина Елена Александровна
e-mail:
elenababaiandinapsu@gmail.com

РЕЗЮМЕ

Обоснование. Этокселированный нонилфенол (ЭНФ) — поверхностно-активное вещество с высокой токсичностью и эндокринно-разрушающим действием, сохраняющимся после частичной биodeградации. В нанобиоремедиации сублетальные концентрации наночастиц могут индуцировать горметический эффект, стимулируя образование биопленок и усиливая катаболический потенциал микроорганизмов. В частности, наночастицы оксида меди (НЧ CuO) в сублетальных концентрациях модифицируют поверхностные свойства клеток и стимулируют формирование биопленок, усиливая биокаталитический потенциал бактерий рода *Rhodococcus* в биоремедиации. Однако механизмы адаптации биопленок родококков к органическим ксенобиотикам и нанометаллам недостаточно изучены.

Цель исследования. Оценить влияние комбинированного воздействия ЭНФ и сублетальных концентраций НЧ CuO на морфологию, свойства и формирование биопленок *Rhodococcus ruber*.

Материалы и методы. Использовали штаммы *R. ruber* ИЭГМ 1263 и ИЭГМ 71 из Региональной профилированной коллекции алканотрофных микроорганизмов. Определяли минимальную ингибирующую концентрацию (МИК) при воздействии ЭНФ (0,16–100 г/л) и НЧ CuO (0,0007–0,5 г/л). Биопленки выращивали на полипропиленовых дисках, ζ-потенциал клеток измеряли методом динамического светорассеяния, жизнеспособность и морфологию клеточной поверхности изучали с помощью совмещенной конфокальной лазерной и атомно-силовой микроскопии (КЛСМ-АСМ).

Результаты. Комбинированное воздействие ЭНФ и НЧ CuO приводило к снижению жизнеспособности родококков на 20–80 %, при этом суммарный токсический эффект определялся воздействием наноксида меди. Биопленки штамма *R. ruber* ИЭГМ 1263, выращенные в присутствии сублетальных (1–10 г/л ЭНФ и 0,001 г/л НЧ CuO) концентраций экотоксикантов, характеризовались пониженной (в 2,6 раз) адсорбцией на носителе, коагgregацией клеток, более отрицательным (–34,2 мВ) значением ζ потенциала и увеличением (до 4,8 нм) шероховатости клеточной поверхности по сравнению с контролем.

Заключение. Выявлены морфофизиологические адаптации клеток *Rhodococcus ruber*, способствующие формированию биопленок и повышению устойчивости бактерий к комплексному химическому стрессу. Полученные данные подтверждают перспективность использования биопленок родококков для биоремедиации экосистем, загрязненных органическими ксенобиотиками и нанометаллами.

Ключевые слова: биопленки, *Rhodococcus*, наночастицы оксида меди, этокселированный нонилфенол, биоремедиация

Статья поступила: 31.03.2026
Статья принята: 18.08.2026
Статья опубликована: 09.10.2026

Для цитирования: Баяндина Е.А., Куюкина М.С., Ившина И.Б. Комбинированное воздействие этокселированного нонилфенола и наночастиц оксида меди (CuO) на биопленки *Rhodococcus ruber*. *Acta biomedica scientifica*. 2026; 11(4): 108–116. doi: 10.29413/ABS.2026-11.4.11

COMBINED EFFECT OF ETHOXYLATED NONYLPHENOL AND COPPER OXIDE NANOPARTICLES (CuO) ON *RHODOCOCCLUS RUBER* BIOFILMS

Bayandina E.A.^{1,2},
Kuyukina M.S.^{1,2},
Ivshina I.B.^{1,2}

¹ Perm State University, (Bukirev St., 15, Perm 614068, Russian Federation)

² Institute of Ecology and Genetics of Microorganisms of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences – branch of the Perm Federal Research Center, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (Golev St., 13, Perm 614081, Russian Federation)

Corresponding author:

Elena A. Bayandina

e-mail:

elenababaiandinapsu@gmail.com

ABSTRACT

Background. Ethoxylated nonylphenol (ENP) is a surfactant characterized by high toxicity and endocrine-disrupting activity that persists after partial biodegradation. In nanobioremediation, sublethal concentrations of nanoparticles can induce a hormetic effect, stimulating biofilm formation and enhancing the catabolic potential of microorganisms. Copper oxide nanoparticles (CuO NPs) at sublethal concentrations modify cell surface properties and stimulate biofilm formation, thereby enhancing the biocatalytic potential of bacteria of the genus *Rhodococcus* in bioremediation processes. However, the mechanisms of *Rhodococcus* biofilm adaptation to organic xenobiotics and nano-metals remain poorly understood.

Aim. To evaluate the effect of combined exposure to ENP and sublethal concentrations of CuO NPs on the morphology, surface properties, and biofilm formation of *Rhodococcus ruber*.

Materials and methods. Strains *R. ruber* IEGM 1263 and IEGM 71 from the Regional Specialized Collection of Alkanotrophic Microorganisms were used. The minimum inhibitory concentration (MIC) was determined under exposure to ENP (0.16–100 g/L) and CuO NPs (0.0007–0.5 g/L). Biofilms were cultivated on polypropylene discs. The ζ -potential of cells was measured by dynamic light scattering, while cell viability and surface morphology were analyzed using combined confocal laser scanning and atomic force microscopy (CLSM-AFM).

Results. Combined exposure to ENP and CuO NPs reduced rhodococcal viability by 20–80 %, whereas the overall toxic effect was mainly determined by copper oxide nanoparticles. Biofilms of the resistant strain *R. ruber* IEGM 1263 grown in the presence of sublethal concentrations of ecotoxins (1–10 g/L ENP and 0.001 g/L CuO NPs) were characterized by decreased adhesion to the carrier (2.6-fold), cell coaggregation, a more negative ζ -potential (–34.2 mV), and increased cell surface roughness (up to 4.8 nm) compared with the control.

Conclusion. Morphophysiological adaptations of *Rhodococcus ruber* cells promoting biofilm formation and increasing bacterial resistance to complex chemical stress were identified. The obtained data confirm the potential of using *Rhodococcus* biofilms for bioremediation of ecosystems contaminated with organic xenobiotics and nano-metals.

Keywords: biofilms, *Rhodococcus*, copper oxide nanoparticles, ethoxylated nonylphenol, bioremediation

Received: 31.03.2026

Accepted: 18.08.2026

Published: 09.10.2026

For citation: Bayandina E.A., Kuyukina M.S., Ivshina I.B. Combined effect of ethoxylated nonylphenol and copper oxide nanoparticles (CuO) on *Rhodococcus ruber* biofilms. *Acta biomedica scientifica*. 2026; 11(4): 108-116. doi: 10.29413/ABS.2026-11.4.11

ВВЕДЕНИЕ

Этоксилированный нонилфенол (ЭНФ) — устойчивое неионогенное поверхностно-активное вещество, относящееся к ксеноэстрогенам. Его массовое поступление в окружающую среду связано с промышленным и бытовым использованием моющих средств. В условиях биологической очистки сточных вод ЭНФ подвергается неполной биодegradации, образуя еще более токсичные продукты — нонилфенол и короткоцепочечные этоксилаты [1, 2]. Высокая химическая стойкость, способность взаимодействовать с клеточными липидами, эндокринно-разрушающая активность и склонность к биоаккумуляции делают эти соединения существенными загрязнителями водных и почвенных экосистем и определяют их экологические и потенциальные медико-биологические риски.

Несмотря на внедрение инновационных биотехнологий очистки сточных вод, эффективность удаления ЭНФ остается недостаточной из-за его устойчивости к биоразложению и токсичности (повреждение клеточных мембран) для микроорганизмов-биодеструкторов [3, 4]. В этой связи растет интерес к использованию биопленок, поскольку клетки в биопленочной форме обладают повышенной резистентностью к токсикантам и сохраняют метаболическую активность в стрессовых условиях [5]. Нанометаллы, в том числе НЧ CuO, влияют на микроорганизмы за счет индукции окислительного стресса, нарушения целостности клеточной стенки и цитоплазматической мембраны [6, 7]. При воздействии нанометаллов на микроорганизмы в сублетальных концентрациях часто наблюдаются изменения морфологии клеток, их адгезивных свойств и формирование многоклеточных агрегатов [8, 9].

Бактерии рода *Rhodococcus* являются перспективными агентами биоремедиации благодаря специфической структуре клеточной стенки, широкому спектру катаболической активности, способности синтезировать развитый экзополимерный матрикс и формировать стабильные биопленки [10].

Металлические наночастицы способны усиливать антимикробное и биоцидное воздействие органических соединений через совместные механизмы, включая генерацию активных форм кислорода, высвобождение ионов и повреждение мембран [11, 12]. В то же время, бактерии могут развивать устойчивость к комбинированному стрессу, вызванному нанометаллами и антибиотиками, через активацию ионных насосов, экспрессию экзополимерного матрикса и адаптацию биопленок [13, 14]. Понимание адаптационных механизмов клинически значимых микроорганизмов важно для прогнозирования рисков появления резистентных форм и снижения эффективности новых наноантибиотиков [15]. С другой стороны, сегодня все большее внимание уделяется взаимодействию полезных микробных биопленок, осуществляющих деградацию органических загрязнителей, с металлическими

наночастицами с целью ускорения биоремедиационных процессов [16].

Нами ранее было показано, что отдельные представители родококков проявляют устойчивость к воздействию как ЭНФ [17], так и НЧ CuO, демонстрируя целый комплекс адаптивных клеточных реакций [18]. Однако в литературе отсутствуют сведения о механизмах адаптации данных бактерий к совместному действию органических ксенобиотиков и нанометаллов.

ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Оценить комбинированное воздействие этоксилированного нонилфенола и наночастиц CuO на жизнеспособность, морфологию, поверхностные свойства клеток и формирование биопленок *Rhodococcus ruber*.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Бактериальные штаммы и химические реагенты. Использовали штаммы *R. ruber* ИЭГМ 71 и ИЭГМ 1263 из Региональной профилированной коллекции алканотрофных микроорганизмов (официальный акроним коллекции ИЭГМ¹). Этоксилированный нонилфенол (ЭНФ) Berol 09 (Akzo Nobel, Швеция) применяли в виде водного раствора. Наночастицы оксида меди (CuO) (50–80 нм) (ООО «Эквилибриум», Россия) диспергировали в PBS (Phosphate-Buffered Saline) (pH 7,4) с использованием ультразвукового гомогенизатора Soniprep 150 (MSE, UK) в течение 15 мин.

Определение МИК. Минимальную ингибирующую концентрацию (МИК) ЭНФ и НЧ CuO при раздельном и совместном внесении определяли методом серийных двукратных разведений в минеральной среде RS в 96-луночных микропланшетах. В первый ряд лунок вносили исходные растворы ЭНФ (100 г/л) и НЧ CuO (0,5 г/л) с последующим двукратным разведением, после чего добавляли 10 мкл бактериальной суспензии ($3,0 \times 10^7$ кл/мл). Планшеты инкубировали 72 ч при 28 °C, затем окрашивали 0,2 % раствором йодонитротетразолия (ИНТ). Оптическую плотность определяли при $\lambda = 630$ нм с использованием спектрофотометра Multiskan Ascent (Thermo Electron Corporation, США).

Получение биопленок на полипропиленовых дисках. Для получения биопленок использовали 250-мл колбы со средой RS с 1,0 об. % *n*-гексадекана, в которые вносили 0,5 мл бактериальной суспензии с $OP_{600} = 1,0$ и диски из вспененного полипропилена ($\varnothing 0,5$ см; 100 шт.), затем добавляли ЭНФ (1,0 г/л) и НЧ CuO (0,001 г/л). В качестве контролей использовали колбы с инокулированной средой без внесения полипропиленовых дисков и/или без добавления ЭНФ и НЧ CuO. Все образцы инкубировали при 28 °C с перемешиванием 120 об/мин в течение 24, 48 и 72 ч. Степень адсорбции клеток на носителе определяли по разнице оптической

1 Региональная профилированная коллекция алканотрофных микроорганизмов (официальный акроним ИЭГМ, www.iegmc.ru).

плотности (ОП 600) культуральной жидкости в опытных и контрольных (без внесения дисков) образцах.

КЛСМ-АСМ. Образец биопленки промывали физиологическим раствором (0,9 % NaCl), наносили на покровное стекло, окрашивали набором LIVE/DEAD® BacLight™ Bacterial Viability Kit (Invitrogen, США) и сканировали с помощью совмещенного конфокального лазерного сканирующего микроскопа FluoView 1000 (Olympus, Япония) и атомно-силового микроскопа MFP-3D-BIO (Asylum Research, США) в полуконтактном режиме на воздухе.

Определение ζ -потенциала. Образец биопленки промывали физиологическим раствором и суспендировали в 1 мМ растворе KNO_3 до достижения ОП 600 равного 0,2. Измерение ζ -потенциала проводили методом динамического светорассеяния на ZetaSizer Nano ZS (Malvern Instruments, Великобритания) при 25 °С.

Статистика. Все данные представлены как среднее значение $\pm$ стандартное отклонение ($M \pm SD$, $n = 3$).

Достоверность различий оценивали с помощью непарного t -теста Стьюдента при $p < 0,05$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В результате комбинированного воздействия ЭНФ и НЧ CuO обнаружен выраженный синергический эффект на жизнеспособность клеток *R. ruber* ИЭГМ 71 (рис. 1А), при этом степень ингибирования бактериальной культуры достигала 20–70 %, что на 10–40 % выше таковой при раздельном действии экотоксикантов. Для сравнения, штамм *R. ruber* ИЭГМ 1263 оказался более устойчивым к комбинированному воздействию ЭНФ и НЧ CuO (рис. 1Б). Так степень жизнеспособности клеток не отличалась от контрольной при низких и умеренных концентрациях экотоксикантов, тогда как при высоких концентрациях наблюдалось 40–75 % ингибирование по сравнению с контролем, однако

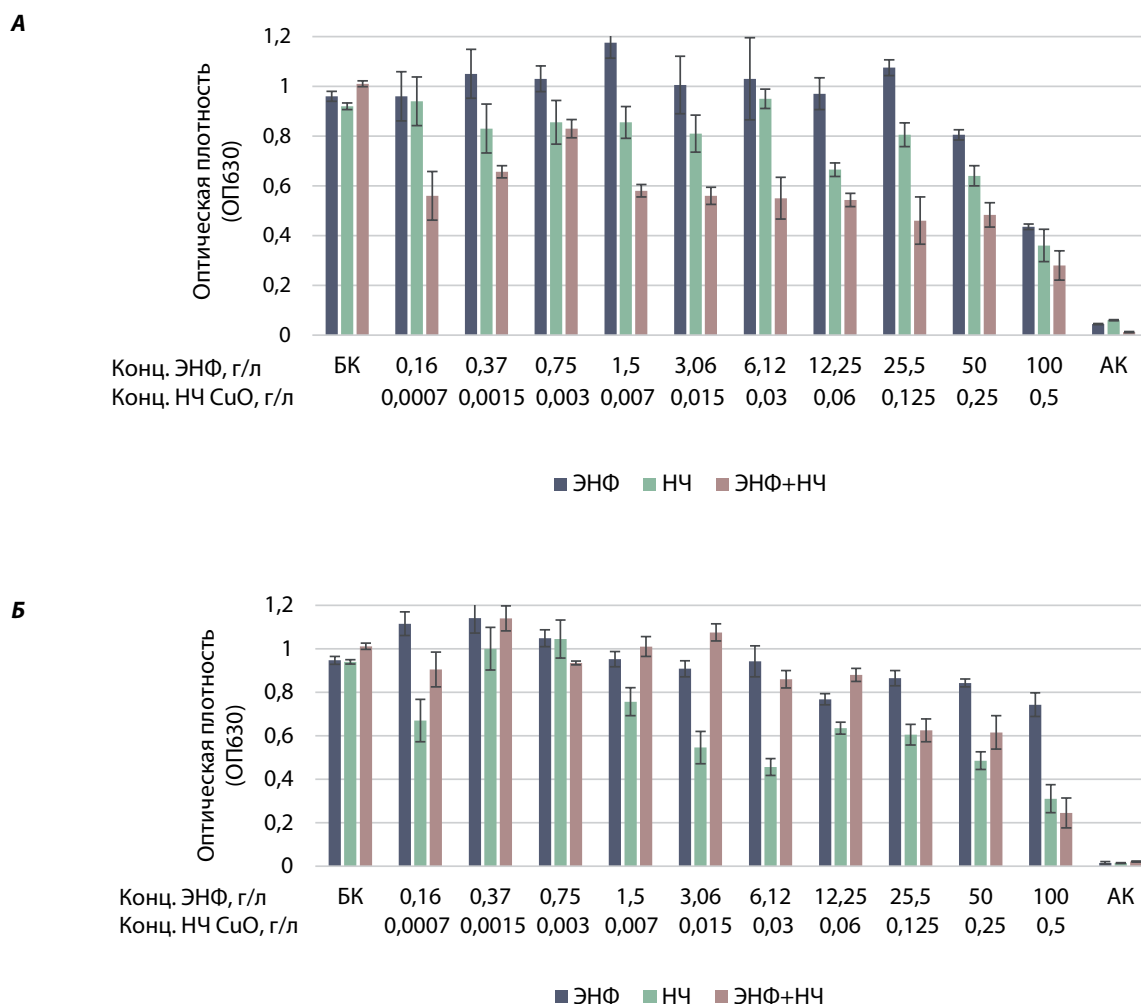


РИС. 1. Снижение жизнеспособности клеток *R. ruber* ИЭГМ 71 (А) и ИЭГМ 1263 (Б) в зависимости от концентрации ЭНФ и НЧ CuO. АК – абиотический контроль, БК – биотический контроль

FIG. 1. Decrease in the viability of *R. ruber* IEGM 71 (А) and IEGM 1263 (Б) cells depending on the concentration of ENP and CuO NPs. АК – abiotic control, БК – biotic control

этот эффект был менее выражен, чем при изолированном действии нанометалла. Для обоих штаммов ингибирующее воздействие НЧ CuO значительно превышало таковое ЭНФ, что согласуется с ранее полученными результатами и литературными данными о высокой токсичности наноксида меди [18].

На основании полученных данных о чувствительности исследованных штаммов родококков к комбинированному воздействию ЭНФ и НЧ CuO для дальнейших экспериментов были выбраны концентрации экотоксикантов, вызывающие выраженный, но не летальный стресс для бактериальных клеток (1,0 и 10 г/л ЭНФ и 0,001 г/л НЧ CuO), что позволило изучить адаптационные свойства биопленок.

Известно, что адгезивные свойства клеток играют ключевую роль в формировании биопленок бактерий рода *Rhodococcus*, определяя их устойчивость к стрессам и эффективность трансформации сложных загрязнителей [10, 19, 20]. Так показано, что при адгезии *R. erythropolis* к металлическим и неметаллическим поверхностям происходит перестройка липидного профиля клеток, что сказывается на эффективности формирования биопленок [21].

Как видно на рисунке 2, степень адсорбции клеток *R. ruber* ИЭГМ 1263 на полипропиленовых дисках в присутствии ЭНФ и НЧ CuO снижалась на 25–45 % по сравнению с контролем, что свидетельствует об уменьшении способности клеток закрепляться на поверхности носителя. Напротив, для штамма *R. ruber* ИЭГМ 71 выявлено статистически достоверное усиление процесса адсорбционной иммобилизации клеток, вплоть до 85 %, в присутствии экотоксикантов. Следует отметить, что в ходе эксперимента наблюдалось образование клеточных агрегатов при одновременном воздействии ЭНФ и НЧ CuO, особенно выраженное для *R. ruber* ИЭГМ 1263, что отражает особенности раннего этапа

формирования биопленок родококков под действием комбинированного химического стресса.

Обнаруженные различия в чувствительности штаммов *R. ruber* ИЭГМ 71 и *R. ruber* ИЭГМ 1263 к комбинированному воздействию ЭНФ и НЧ CuO, вероятно, связаны с местом их выделения, а также генетическими и фенотипическими особенностями. Штамм *R. ruber* ИЭГМ 1263², выделенный из нефтезагрязненных отходов, характеризуется более широким спектром каталитической активности, включая биodeградацию бензола и ксилола, что может влиять на устойчивость к комплексному химическому стрессу. Напротив, штамм *R. ruber* ИЭГМ 71³, изолированный из поверхностных вод, в условиях стресса, вероятно, активирует усиленную адгезию и формирует биопленки как средства защиты.

С помощью совмещенного КЛСМ-АСМ сканирования были изучены морфологические изменения клеток *R. ruber* ИЭГМ 1263 в составе биопленок при комбинированном воздействии ЭНФ и НЧ CuO (рис. 3). Установлено, что в контрольных условиях клетки родококков имели характерную палочковидную форму и гладкую поверхность со слабо выраженным нанорельефом (рис. 3А), сохраняющуюся в присутствии сравнительно низкой (1,0 г/л) концентрации ЭНФ (рис. 3Б). Комбинированное воздействие ЭНФ (1,0 г/л) и НЧ CuO (0,001 г/л) вызывало нарушение гладкого рельефа, увеличение структурной неоднородности поверхности и усиление клеточной агрегации (рис. 3В).

При повышении концентрации ЭНФ до 10 г/л в присутствии НЧ CuO наблюдалось увеличение числа мертвых и поврежденных клеток, искажение формы и формирование крупных плотных клеточных агрегатов с заметными перепадами высоты рельефа поверхности (рис. 3Г), свидетельствующее об усилении стрессиндуцированных морфологических

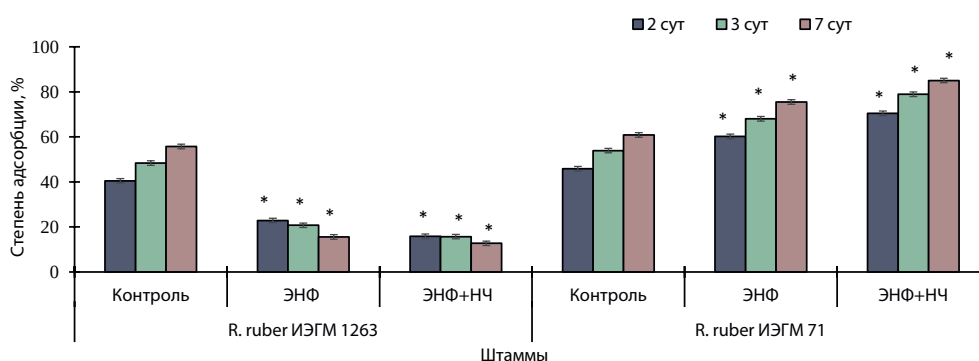


РИС. 2.

Влияние ЭНФ (1,0 г/л) и НЧ CuO (0,001 г/л) на адсорбционную иммобилизацию клеток родококков на полипропиленовых дисках. * – достоверные различия с контролем ($p < 0,05$)

FIG. 2.

Effect of ENP (1.0 g/L) and CuO NPs (0.001 g/L) on the adsorption immobilization of rhodococcal cells on polypropylene disks. * – significant differences from the control ($p < 0.05$)

2 Региональная профилированная коллекция алканотрофных микроорганизмов (ИЭГМ). Паспорт штамма *Rhodococcus ruber* ИЭГМ 1263 (http://www.iegmcol.ru/strains/rhodoc/ruber/r_ruber1263.html)

3 Региональная профилированная коллекция алканотрофных микроорганизмов (ИЭГМ). Паспорт штамма *Rhodococcus ruber* ИЭГМ 71 (http://www.iegmcol.ru/strains/rhodoc/ruber/r_ruber71.html)

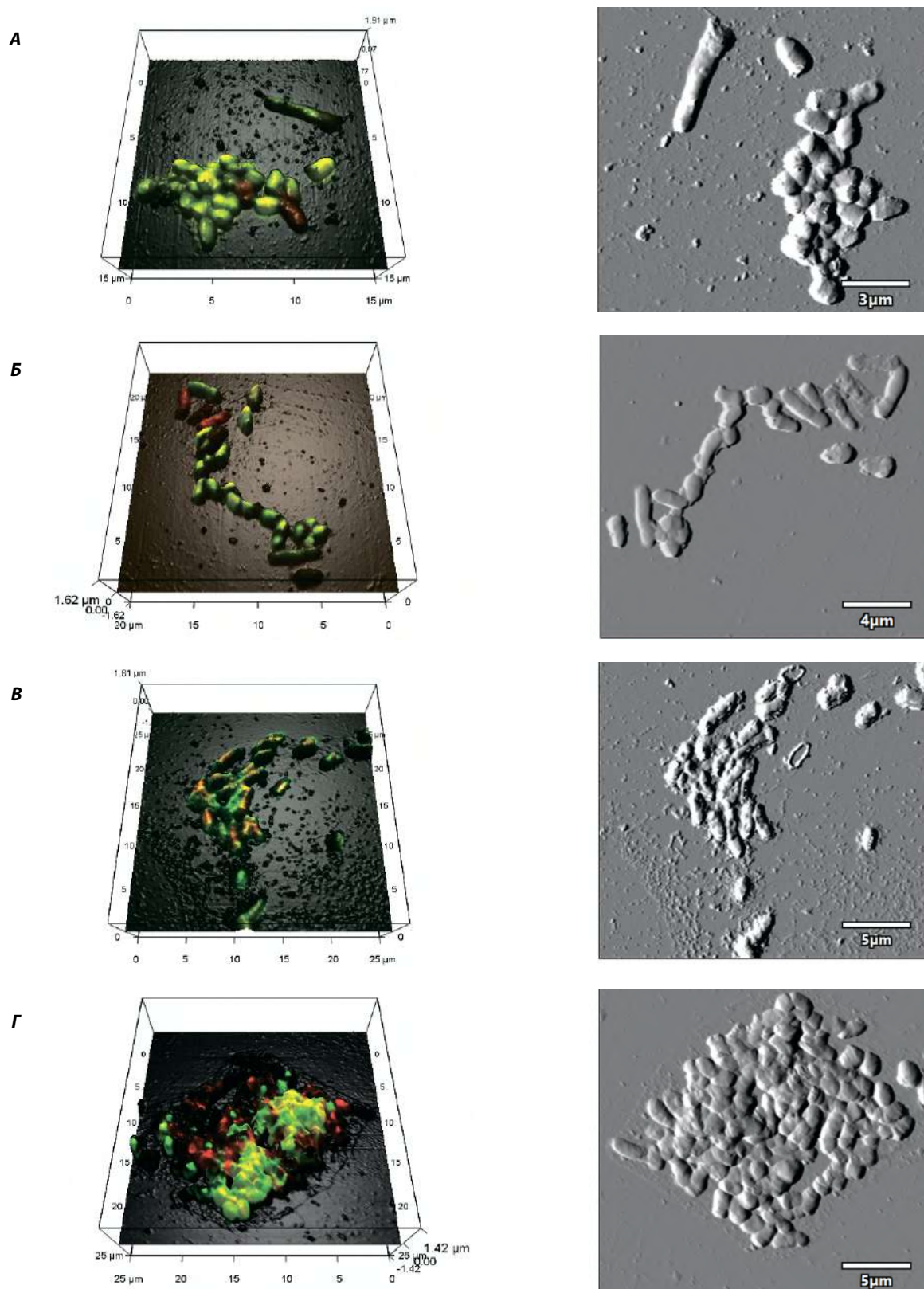


РИС. 3.

Совмещенные 3D КЛСМ-АСМ изображения (слева) и АСМ сканы (по каналу высоты) (справа) клеток *R. ruber* ИЭГМ 1263 в контроле (А); в присутствии ЭНФ (1,0 г/л) (Б); ЭНФ (1,0 г/л) и НЧ CuO (0,001 г/л) (В); ЭНФ (10 г/л) и НЧ CuO (0,001 г/л) (Г). Клетки окрашены с помощью набора LIVE/DEAD, живые – светятся зеленым, мертвые – красным, с поврежденной клеточной мембраной – желто-оранжевым цветом

FIG. 3.

Combined 3D CLSM-AFM images (left) and AFM scans (height channel) (right) of *R. ruber* IEGM 1263 cells in the control (A); in the presence of ENP (1.0 g/L) (Б); ENP (1.0 g/L) and CuO NPs (0.001 g/L) (В); ENP (10 g/L) and CuO NPs (0.001 g/L) (Г). Cells were stained using the LIVE/DEAD kit: live cells appear green, dead cells appear red, and cells with damaged cell membranes appear yellow-orange

перестроек. Полученные результаты согласуются с ранее полученными нами [18] и литературными [22] данными по индуцированному НЧ CuO увеличению продукции экзополимерного матрикса, особенно его белкового компонента, как защитному стресс-ответу биопленки.

Показатели среднеквадратичной шероховатости (Rq) поверхности клеток *R. ruber* ИЭГМ 1263 также варьировали в зависимости от условий воздействия на них ЭНФ и НЧ CuO (рис. 4). В контрольных образцах величина Rq составляла $2,5 \pm 0,53$ нм, что характерно для относительно гладкого нанорельефа клеточной поверхности. Под воздействием ЭНФ в концентрации 1,0 г/л значение Rq оставалось близким к контролю ($2,4 \pm 0,87$ нм), подтверждая отсутствие значимых морфологических изменений клеток.

Комбинированное воздействие ЭНФ (1,0 г/л) и НЧ CuO (0,001 г/л) вызывало статистически значимое увеличение показателя шероховатости клеточной поверхности до $4,8 \pm 0,67$ нм. Выявленный двукратный рост значения Rq может отражать адсорбцию НЧ CuO или ионов Cu^{2+} на клеточной поверхности. Кроме того, это может быть связано с изменением локализации поверхностных липидов, как ранее было показано при воздействии на родококки наночастиц оксида меди [18].

Электрокинетический (ζ) потенциал является интегральным показателем клеточного заряда и чувствительным индикатором повреждений цитоплазматической мембраны при воздействии на клетку НЧ металлов [23]. Анализ динамики ζ -потенциала клеток *R. ruber* ИЭГМ 1263 выявил повышение отрицательно заряда клеточной поверхности при всех вариантах воздействия ЭНФ и наноксида меди (рис. 5). Так при добавлении ЭНФ (1,0 г/л) ζ -потенциал изменялся от $-25,55 \pm 0,4$ мВ в контроле до $-31,4 \pm 0,5$ мВ, указывая на увеличение плотности отрицательно заряженных групп на поверхности клеточной стенки.

Комбинированное воздействие ЭНФ (1,0 г/л) и НЧ CuO (0,001 г/л) приводило к дальнейшему смещению ζ -потенциала в отрицательную область (до $-34,2 \pm 0,4$ мВ), что свидетельствует о существенной перестройке поверхностных структур

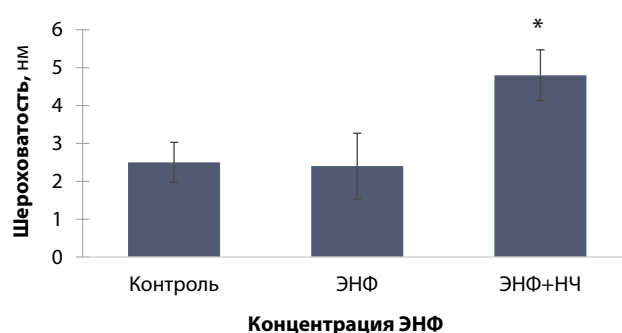


РИС. 4.

Среднеквадратичная шероховатость (Rq) поверхности клеток биопленки *R. ruber* ИЭГМ 1263 в контроле, в присутствии ЭНФ (1,0 г/л) и при совместном воздействии ЭНФ (1,0 г/л) и НЧ CuO (0,001 г/л). * – статистически значимые различия по сравнению с контролем ($p < 0,05$)

FIG. 4.

Root mean square roughness (Rq) of the biofilm cell surface of *R. ruber* IEGM 1263 in the control, in the presence of ENP (1.0 g/L), and under combined exposure to ENP (1.0 g/L) and CuO NPs (0.001 g/L). * – statistically significant differences compared to the control ($p < 0.05$)

и вероятной адсорбции отрицательно заряженных наночастиц оксида меди на клеточной стенке родококков, как показано нами ранее [18].

Стоит отметить, что ζ -потенциал клеток *R. ruber* ИЭГМ 1263 вырос до -50 мВ на 7-е сутки при комбинированном воздействии низких концентраций ЭНФ (1 г/л) и НЧ CuO (0,1 г/л), тогда как при более высокой концентрации ЭНФ (10 г/л) аналогичный эффект отсутствовал. Ранее было показано [24], что значения ζ -потенциала клеток родококков закономерно сдвигаются в сторону показателей, характерных для НЧ, что свидетельствует об их аккумуляции на поверхности клеток. Кроме того, ЭНФ как поверхностно-активное вещество может связываться с НЧ CuO и тем самым влиять на агрегационную стабильность: при высокой концентрации ЭНФ вероятно образование ассоциатов с наночастицами, что снижает их доступность для адсорбции на клеточной поверхности [25].

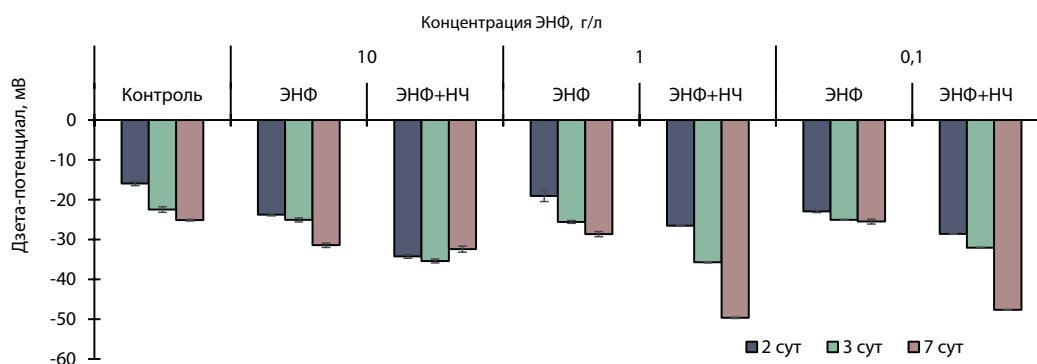


РИС. 5.

Влияние ЭНФ и НЧ CuO (0,001 г/л) на ζ -потенциал клеток *R. ruber* ИЭГМ 1263 в биопленке

FIG. 5.

Effect of ENP and CuO NPs (0.001 g/L) on the ζ -potential of *R. ruber* IEGM 1263 cells in the biofilm

Таким образом, выявленные изменения клеток *R. ruber* ИЭГМ 1263 при комбинированном воздействии ЭНФ и НЧ CuO – снижение адгезии, усиление коагрегации, увеличение шероховатости и отрицательного ζ-потенциала – могут рассматриваться как адаптивный ответ на стресс, повышающий устойчивость биопленок. Снижение адгезии и агрегация способствуют защите клеток внутри агрегатов [22], а увеличение отрицательного заряда и шероховатости, вероятно, связано с синтезом экзополимерного матрикса, создающего дополнительный барьер для токсикантов [18, 24].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе исследования установлено, что комбинированное воздействие ЭНФ (1,0 г/л) и сублетальных концентраций НЧ CuO (0,001 г/л) на биопленки *Rhodococcus ruber* индуцирует комплекс морфологических изменений (изменение формы клеток и их агрегация, повышение шероховатости и отрицательного ζ-потенциала клеточной поверхности), способствующих повышению устойчивости к комплексному химическому стрессу. Полученные данные позволяют рассматривать биопленки родококков как перспективный объект для использования в биоремедиации экосистем, загрязненных нанометаллами и органическими ксенобиотиками.

Финансирование

Исследования выполнены в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации FSNF-2025-0013.

Выражение признательности

Использовано оборудование ЦКП «Специализированный кабинет атомно-силовой и конфокальной микроскопии» ПГНИУ и ЦКП «Региональная профилированная коллекция алканотрофных микроорганизмов» ПФИЦ УрО РАН.

Конфликт интересов

Авторы данной статьи заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Zhang J, Yang M, Zhang Y, Chen M. Biotransformation of nonylphenol ethoxylates during sewage treatment under anaerobic and aerobic conditions. *J Environ Sci (China)*. 2008; 20(2): 135–141. doi: 10.1016/S1001-0742(08)60021-2
2. Lu D, Yu L, Li M, Zhai Q, Tian F, Chen W. Behavioral disorders caused by nonylphenol and strategies for protection. *Chemosphere*. 2021; 275: 129973. doi: 10.1016/j.chemosphere.2021.129973
3. Corvini PF, Vinken R, Hommes G, Schmidt B, Dohmann M. Degradation of the radioactive and non-la-

- belled branched 4(3',5'-dimethyl 3'-heptyl)-phenol nonylphenol isomer by sphingomonas TTNP3. *Biodegradation*. 2004; 15(1): 9–18. doi: 10.1023/b:biod.0000009937.20251.d2
4. Lu J, Jin Q, He Y, Wu J, Zhao J. Biodegradation of nonylphenol ethoxylates by *Bacillus* sp. LY capable of heterotrophic nitrification. *FEMS Microbiol Lett*. 2008; 280(1): 28–33. doi: 10.1111/j.1574-6968.2007.01039.x
5. Mishra S, Huang Y, Li J, Wu X, Zhou Z, Lei Q, et al. Biofilm-mediated bioremediation is a powerful tool for the removal of environmental pollutants. *Chemosphere*. 2022; 294: 133609. doi: 10.1016/j.chemosphere.2022.133609
6. Ningombam L, Mana T, Apum G, Ningthoujam R, Singh YD. Nano-bioremediation: A prospective approach for environmental decontamination in focus to soil, water, and heavy metals. *Environ Nanotechnol Monit Manag*. 2024; 21: 100931. doi: 10.1016/j.enmm.2024.100931
7. Asghar N, Hussain A, Nguyen DA, Ali S, Hussain I, Junejo A, et al. Advancement in nanomaterials for environmental pollutants remediation: a systematic review on bibliometrics analysis, material types, synthesis pathways, and related mechanisms. *J Nanobiotechnology*. 2024; 22(1): 26. doi: 10.1186/s12951-023-02151-3
8. Yang Y, Alvarez PJJ. Sublethal Concentrations of Silver Nanoparticles Stimulate Biofilm Development. *Environ Sci Technol Lett*. 2015; 2(8): 221–226. doi: 10.1021/acs.estlett.5b00159
9. Miao L, Wang C, Hou J, Wang P, Ao Y, Li Y, et al. Response of wastewater biofilm to CuO nanoparticle exposure in terms of extracellular polymeric substances and microbial community structure. *Sci Total Environ*. 2017; 579: 588–597. doi: 10.1016/j.scitotenv.2016.11.056
10. Ившина И.Б., Куюкина М.С., Криворучко А.В., Тюмина Е.А. Актиномицеты *Rhodococcus ruber* – ключевые и универсальные биоокислители газообразных алканов C₂–C₄. *Микробиология*. 2025; 94(1): 3–32. [Ivshina IB, Kuyukina MS, Krivoruchko AV, Tyumina EA. Actinomycetes *Rhodococcus ruber* – key and universal biooxidizers of gaseous alkanes C₂–C₄. *Microbiology*. 2025; 94(1): 3–32. (In Russ.)]. doi: 10.7868/S3034546425010019
11. Abdullah J, Jamil T, Atif M, Khalid S, Metwally K, Yahya G, et al. Recent Advances in the Development of Metal/Metal Oxide Nanoparticle and Antibiotic Conjugates (MNP–Antibiotics) to Address Antibiotic Resistance: Review and Perspective. *Int J Mol Sci*. 2024; 25(16): 8915. doi: 10.3390/ijms25168915
12. Slavin YN, Asnis J, Häfeli UO, Bach H. Metal nanoparticles: understanding the mechanisms behind antibacterial activity. *J Nanobiotechnology*. 2017; 15(1): 65. doi: 10.1186/s12951-017-0308-z
13. Pal C, Asiani K, Arya S, Rensing C, Stekel DJ, Larsson DGJ, et al. Chapter Seven – Metal Resistance and Its Association with Antibiotic Resistance. *Advances in Microbial Physiology*. 2017; 70: 261–313. doi: 10.1016/b.sampbs.2017.02.001
14. Niño-Martínez N, Salas Orozco ME, Martínez-Castañón GA, Torres Méndez F, Ruiz F. Molecular Mechanisms of Bacterial Resistance to Metal and Metal Oxide Nanoparticles. *Int J Mol Sci*. 2019; 20(11): 2808. doi: 10.3390/ijms20112808

15. Prabhu C, Uchangi S, Deekshit VK. Understanding Bacterial Resistance to Heavy Metals and Nanoparticles: Mechanisms, Implications, and Challenges. *J Basic Microbiol.* 2025; 65(2): e2400596. doi: 10.1002/jobm.202400596
16. Kuyukina MS, Bayandina EA, Ivshina IB. Interactions of microbial biofilms with metal nanoparticles in the context of bioremediation. *Folia Microbiologica.* 2026; 1–11. doi: 10.1007/s12223-026-01459-5
17. Баяндина Е.А., Поздеева А.В., Куюкина М.С., Ившина И.Б. Устойчивость коллекционных штаммов родококков к воздействию экотоксиканта – этоксилированного нонилфенола. *Вестник ПГУ. Биология.* 2023; (4): 337–348. [Bayandina EA, Pozdeeva AV, Kuyukina MS, Ivshina IB. Resistance of *Rhodococcus* collection strains to the effects of ecotoxicant – ethoxylated nonylphenol. *Bulletin of PSU. Biology.* 2023; (4): 337–348. (In Russ.)]. doi: 10.17072/1994-9952-2023-4-337-348
18. Kuyukina MS, Bayandina EA, Kostrikin NA, Sorokin VV, Mulyukin AL, Ivshina IB. Adaptations of *Rhodococcus rhodochrous* biofilms to oxidative stress induced by copper(II) oxide nanoparticles. *Langmuir.* 2025; 41(2): 1356–1367. doi: 10.1021/acs.langmuir.4c03987
19. de Carvalho CCCR. *Adaptation of Rhodococcus to organic solvents Biology of Rhodococcus.* Cham: Springer. 2019; 16: 109–131. doi: 10.1007/978-3-642-12937-7_5
20. Pátek M, Grulich M, Nešvera J. Stress response in *Rhodococcus* strains. *Biotechnol Adv.* 2021; 53: 107698. doi: 10.1016/j.biotechadv.2021.107698
21. Rodrigues CJC, de Carvalho CCRC. *Rhodococcus erythropolis* cells adapt their fatty acid composition during biofilm formation on metallic and non-metallic surfaces. *FEMS Microbiol Ecol.* 2015; 91(12): fiv135. doi: 10.1093/femsec/fiv135
22. Miao L, Wang C, Hou J, Wang P, Ao Y, Li Y, et al. Aggregation and removal of copper oxide (CuO) nanoparticles in wastewater environment and their effects on the microbial activities of wastewater biofilms. *Bioresour Technol.* 2016; 216: 537–544. doi: 10.1016/j.biortech.2016.05.082
23. Ferreyra Maillard A, Gonçalves S, Santos NC, López de Mishima BA, Dalmaso PR, Hollmann A. Studies on interaction of green silver nanoparticles with whole bacteria by surface characterization techniques. *Biochim. Biophys. Acta. Biomembranes.* 2019; 1861(6): 1086–1092. doi: 10.1016/j.bbamem.2019.03.011
24. Kuyukina MS, Makarova MV, Pistsova ON, Glebov GG, Osipenko MA, Ivshina IB. Exposure to metal nanoparticles changes zeta potentials of *Rhodococcus* cells. *Heliyon.* 2022; 8(11): e11632. doi: 10.1016/j.heliyon.2022.e11632
25. Khan R, Inam MA, Khan S, Jiménez AN, Park DR, Yeom IT. The Influence of Ionic and Nonionic Surfactants on the Colloidal Stability and Removal of CuO Nanoparticles from Water by Chemical Coagulation. *Int. J. Environ. Res. Public. Health.* 2019; 16(7): 1260. doi: 10.3390/ijerph16071260

Сведения об авторах

Баяндина Елена Александровна – аспирант, инженер-исследователь *Rhodococcus*-центра, ФГАОУ ВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет»; младший научный сотрудник лаборатории механобиологии живых систем, ФГБУН «Институт экологии и генетики микроорганизмов Уральского отделения Российской академии наук» – филиал ФГБУН «Пермский федеральный исследовательский центр» УрО РАН; e-mail: elenabaiaandinapsu@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-9266-3877>

Куюкина Мария Станиславовна – доктор биологических наук, профессор кафедры микробиологии и иммунологии, ФГАОУ ВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет»; ведущий научный сотрудник, ФГБУН «Институт экологии и генетики микроорганизмов Уральского отделения Российской академии наук» – филиал ФГБУН «Пермский федеральный исследовательский центр» УрО РАН; e-mail: kuyukina@iegm.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9165-8363>

Ившина Ирина Борисовна – доктор биологических наук, профессор, академик РАН, профессор кафедры микробиологии и иммунологии, ФГАОУ ВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет»; заведующая лабораторией, ФГБУН «Институт экологии и генетики микроорганизмов Уральского отделения Российской академии наук» – филиал ФГБУН «Пермский федеральный исследовательский центр» УрО РАН; e-mail: lvshina@iegm.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2558-4789>

Information about the authors

Elena A. Bayandina – postgraduate student, research engineer at the *Rhodococcus* Centre; Perm State University (PSU); junior researcher at the Laboratory of Mechanobiology of Living Systems, Institute of Ecology and Genetics of Microorganisms of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences – branch of the Perm Federal Research Center, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences; e-mail: elenabaiaandinapsu@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-9266-3877>

Maria S. Kuyukina – Dr. Sc. (Biol.), professor at the Department of Microbiology and Immunology, Perm State University (PSU); leading researcher, Institute of Ecology and Genetics of Microorganisms of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences – branch of the Perm Federal Research Center, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences; e-mail: kuyukina@iegm.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9165-8363>

Irina B. Ivshina – Dr. Sc. (Biol.), professor, member of the Russian Academy of Sciences, professor at the Department of Microbiology and Immunology, Perm State University (PSU); head of the Laboratory, Institute of Ecology and Genetics of Microorganisms of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences – branch of the Perm Federal Research Center, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences; e-mail: lvshina@iegm.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2558-4789>

Статья опубликована в рамках VII Всероссийской научно-практической конференции молодых учёных с международным участием «ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ И ПРИКЛАДНЫЕ АСПЕКТЫ В МЕДИЦИНЕ И БИОЛОГИИ», 22–24 июня 2026 г.